СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Check for updates

Научная статья

УДК 624.012.04-52
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-7-18

Исследование эффективности композитного продольного и поперечного усиления при увеличении прочности и жесткости гибких внецентренно сжатых железобетонных стоек

С.В. Георгиев ✉, **Д.Р. Маилян**, **А.И. Соловьева**

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ sergey.georgiev@bk.ru

Аннотация

Введение. Использование композитных материалов для повышения эксплуатационных характеристик строительных конструкций при реконструкции в последние годы постепенно вытесняет методы, разработанные еще в середине XX века и основанные на использовании для этих целей железобетона и металла. Однако нормативная база, регламентирующая процесс усиления несущих конструкций зданий и сооружений, разработана на основе недостаточного количества экспериментальных данных. Это привело к тому, что большой объем конструкций, выходящих за нормативные ограничения, невозможно усиливать композитными материалами или это приводит к существенным экономическим затратам. Таким образом, экспериментальные исследования в области усиления композитными материалами железобетонных конструкций являются перспективными и актуальными на сегодняшний день. Целью настоящей работы стал анализ результатов ряда экспериментов, проведенных для исследования применения композитных материалов в строительстве и их эффективности.

Материалы и методы. Для определения напряжения в композитных углеродных материалах внешнего армирования внецентренно сжатых железобетонных стоек были проведены испытания четырех опытных образцов. Все образцы имели разные схемы усиления. В наиболее характерных зонах работы композитных материалов были наклеены тензодатчики с базой 2 см, которые считывали изменения относительных деформаций на каждом уровне нагрузки в процессе испытания образцов. На каждую конструкцию наклеивалось от 10 до 16 тензодатчиков в зависимости от важности зон определения деформаций.

Результаты исследования. В работе приведены результаты исследований определения эффективности композитного продольного и поперечного усиления на увеличение жесткости и прочности гибких внецентренно сжатых железобетонных стоек. Приведены экспериментальные данные прочности, прогибов и относительных деформаций композитных материалов, полученных при испытании четырех железобетонных стоек. Выполнена оценка эффективности композитного усиления при 3предельной прочности и допустимых прогибах. Определены относительные деформации в композитных материалах и произведена оценка включения системы усиления в работу железобетонных усиленных образцов.

Обсуждение и заключение. На основании полученных результатов выполнен анализ эффективности композитного усиления и разработаны предложения по проектированию систем усиления гибких внецентренно сжатых железобетонных стоек, работающих с большими эксцентриситетами приложения нагрузки.

Ключевые слова: углепластик, бетон, железобетон, сталь, композитная арматура, усиление, деформации, напряжение

Для цитирования. Георгиев С.В., Маилян Д.Р., Соловьева А.И. Исследование эффективности композитного продольного и поперечного усиления при увеличении прочности и жесткости гибких внецентренно сжатых железобетонных стоек. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):7–18. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-7-18

Original article

Studying the Efficiency of Composite Longitudinal and Transverse Reinforcement for Increasing the Strength and Rigidity of Flexible Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Poles

Sergey V. Georgiev ✉, **Dmitry R. Mailyan**, **Anastasia I. Solovyova**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ sergey.georgiev@bk.ru

Abstract

Introduction. In recent years, the use of composite materials for improving the operational properties of the building constructions within the restoration process is gradually replacing the methods, developed for this purpose in the middle of the XXth century and implying the use of reinforced concrete and metal. However, the regulatory framework stipulating the process of strengthening the loadbearing structures of buildings and structures was developed based on the insufficient amount of experimental data. Due to this fact, the large number of structures, exceeding the normative limits, cannot be strengthened with the composite materials, or such strengthening incurs significant economic costs. Thus, nowadays, the experimental studies on strengthening the reinforced concrete structures with composite materials are considered to be forward-looking and relevant. The aim of this study is to analyse the results of a number of experiments conducted to investigate the use and efficiency of composite materials in construction.

Materials and Methods. To determine the level of stress in composite carbon materials of the external reinforcement of the eccentrically compressed reinforced concrete poles, the tests were carried out with four specimens. All specimens were strengthened using different reinforcement schemes. The strain gauges with 2 cm active measuring grid length were installed in the zones of the most evident work of the composite materials to measure the changes of relative deformation at each load level during testing of the specimens. From 10 to 16 strain gauges were installed at each structure, depending on the importance of the zones for determining the deformations.

Results. The work presents the results of the study on determining the efficiency of composite longitudinal and transverse reinforcement for increasing the rigidity and strength of flexible eccentrically compressed reinforced concrete poles. The experimental data on the composite materials' strength, deflections and relative deformations, obtained during testing of four reinforced concrete poles, is presented. The efficiency of composite reinforcement at ultimate strength and ultimate deflections is assessed. The relative deformations in composite materials are determined and the inclusion of the reinforcement system in the work of the strengthened reinforced concrete specimens is assessed.

Discussion and Conclusion. Based on the obtained results, the analysis of the composite reinforcement efficiency has been carried out, and proposals have been developed on designing the reinforcement systems of the flexible eccentrically compressed reinforced concrete poles working with the large eccentricities of the load application.

Keywords: carbon fiber-reinforced plastic, concrete, reinforced concrete, steel, composite reinforcement, strengthening, deformation, stress

For citation. Georgiev SV, Mailyan DR, Solovyova AI. Studying the Efficiency of Composite Longitudinal and Transverse Reinforcement for Increasing the Strength and Rigidity of Flexible Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Poles. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2023;2(4):7–18. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-7-18

Введение. В современном строительстве все работы, относящиеся к реконструкции, условно можно разделить на два направления: возведение новых и восстановление или усиление существующих строений [1–3]. Последнее, особенно актуально в условиях тесной городской застройки, где работы по сносу зданий и строительству новых связаны с существенными затратами [4–6], что особенно важно при частичном усилении несущих конструкций зданий [7, 8].

Наиболее популярным материалом для изготовления конструкций зданий является железобетон [9–11]. Его высокие прочностные свойства и хорошее сопротивление к воздействию агрессивных факторов окружающей среды [12], а также доступность и низкая стоимость материалов приводят к тому, что в подавляющем числе строящихся объектов несущие конструкции изготовлены из железобетона. С ростом объемов строительства растет и число объектов, где требуется проводить усиление [13].

При выборе метода усиления наиболее важным фактором является его технико-экономическое обоснование. Из существующих методов наиболее надежным является усиление железобетонными обоймами [14, 15], однако данный метод усиления достаточно трудоемкий в связи со сложностью производства работ, а в ряде случаев является экономически не целесообразным. Другой метод усиления базируется на использовании металлических обойм [16, 17]. Этот метод является дорогостоящим из-за высокой стоимости металла и сложности сварочных работ. Применяется, когда требуется увеличение несущей способности конструкций до 50 %.

Наряду с приведенными выше традиционными методами усиления в настоящее время набирает популярность использование композитных материалов [18–20]. Известные системы композитного усиления, основанные на использовании углеткани, позволяют существенно сократить сроки производства работ, а особенность технологии производства работ позволяет не останавливать производственные процессы в помещениях зданий, где производится усиление [21].

В области проектирования сжатых элементов наиболее распространенными являются конструкции малой гибкости, работающие с небольшими эксцентриситетами приложения нагрузки. Такие конструкции эффективно усиливаются композитными материалами с расположением волокон углеткани в поперечном направлении [22, 23].

В 2014 году был опубликован свод правил по усилению железобетонных конструкций композитными материалами, который регламентировал порядок и методы расчетной оценки усиленных железобетонных конструкций на законодательном уровне. Однако высокая эффективность композитного поперечного усиления достигается в соответствии с СП только в конструкциях малой гибкости и работающих с эксцентриситетом приложения нагрузки, не превышающем 0,1 h. Такие ограничения существенно снижают перечень реальных конструкций, для которых рекомендуется использовать композитное усиление. К таким конструкциям относятся опоры эстакад и путепроводов, колонны промышленных зданий с мостовыми кранами, фахверки и конвейерные системы и др. [24].

С целью определения эффективности композитного усиления конструкций, эксплуатационные характеристики которых выходят за ограничения свода правил, были изготовлены, усилены композитными материалами фирмы «BASF» и испытаны ряд железобетонных стоек. Гибкость опытных элементов выходит за предельно допустимые значения ограничений свода правил $\lambda_i = 66 > 50$. Аналогично и значение эксцентриситета приложения нагрузки принималась равным 0,16 h, что больше нормативного 0,1 h.

В процессе выполнения эксперимента наибольшее внимание уделялось определению коэффициентов усиления по предельной прочности и уровню нагрузки при предельных прогибах, а также определение значений относительных деформаций в композитных материалах в процессе испытания. Последнее позволило определить уровень напряжения в композитных материалах с целью определения наиболее эффективных схем внешнего композитного армирования.

Помимо поперечного усиления в эксперименте исследовалось влияние продольного усиления, состоящие из двух углеродных ламелей. К тому же с целью определения возможности расширения положения норм были изучены новые, не охваченные нормами, схемы усиления.

Целью данного научного исследования является определение наиболее эффективных схем усиления гибких внецентренно-сжатых железобетонных стоек, работающих с большим эксцентриситетом приложения нагрузки, и разработка предложений по рациональному армированию конструкций системой композитного усиления.

Для осуществления поставленных целей были решены следующие задачи:

– изготовлены, усилены и испытаны железобетонные стойки;

– по результатам испытаний были определены предельные прочности и значения относительных деформаций композитных материалов на всех этапах загружения;

– построены графики отношения относительных деформаций к прочности (σ–ε) согласно полученным данным относительных деформаций композитных материалов;

– произведен анализ полученных результатов эксперимента и предложены рекомендации к применению системы усиления.

Материалы и методы. В качестве материалов исследования были взяты результаты испытаний шести опытных образцов. Один эталонный образец и пять образцов, усиленных разными вариантами композитного армирования, испытывались при эксцентриситете приложения нагрузки, равном 4,0 см (0,32 h).

Опытные образцы имели габариты 12,5×25×240 см. Внутреннее армирование состояло из четырех стержней арматуры класса А500 диаметром 12, поперечное — класса В500 диаметром 6, с шагом S1=180 мм. Защитный слой бетона составлял 2,5 см. В торцах устанавливались по шесть металлических сеток на приопорных участках для предотвращения смятия. Сетки устанавливались согласно результатам расчетов на местное сжатие.

Проектируемый класс бетона конструкций принимался В35. Экспериментальные значения прочности бетона, полученные по результатам испытания шести кубов с ребром 15×15 см, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты испытания опытных образцов

п/п №	Шифр стоек	Класс бетона B	Прочность N_s; $N_{s,f}$, кН	Прочность при прогибе 6 мм N_s; $N_{s,f}$, кН	Прогибы f^{exp},мм	Коэффициент усиления при прямом сопоставлении, k_{f1}	Коэффициент усиления при приведенной прочности бетона k_{f2} (R_b^s/R_b^c)	Коэффициент усиления при приведенной прочности бетона 6мм k_{f3}
1	ВГ	35,2	242,5	95	33,9	1,0	–	–
2	ВГУ–X_3	35,2	290,0	150	31,4	1,2	1,2	1,58
3	ВГУ–X_5	30,1	270	110	40,5	1,11	1,3	1,35
4	ВГУ–X_4Lp	39,8	504,5	215	32,4	2,08	1,84	2,0

Все образцы испытывались ступенчато возрастающей нагрузкой (10–12 этапов) с выдержкой 5–10 минут на каждом этапе загружения.

Фото усиленных опытных образцов приведены на рис. 1, а описание системы композитного усиления приведено в таблице 1.



ВГ ВГУ–X_3 ВГУ–X_5 ВГУ–X_4L_p

Рис. 1. Характер разрушения опытных образцов

Результаты исследования. Характер разрушения опытных образцов зависел от схемы композитного усиления. Фото разрушенных образцов приведены на рис 1. В таблице 1 представлены основные характеристики опытных образцов и результаты испытаний. На рис. 2–5 приведены схемы установки тензодатчиков на композитных материалах в наиболее нагруженных зонах (слева на рисунке) и графики изменения относительных деформаций по отношению к уровню нагрузки (справа на рисунке).

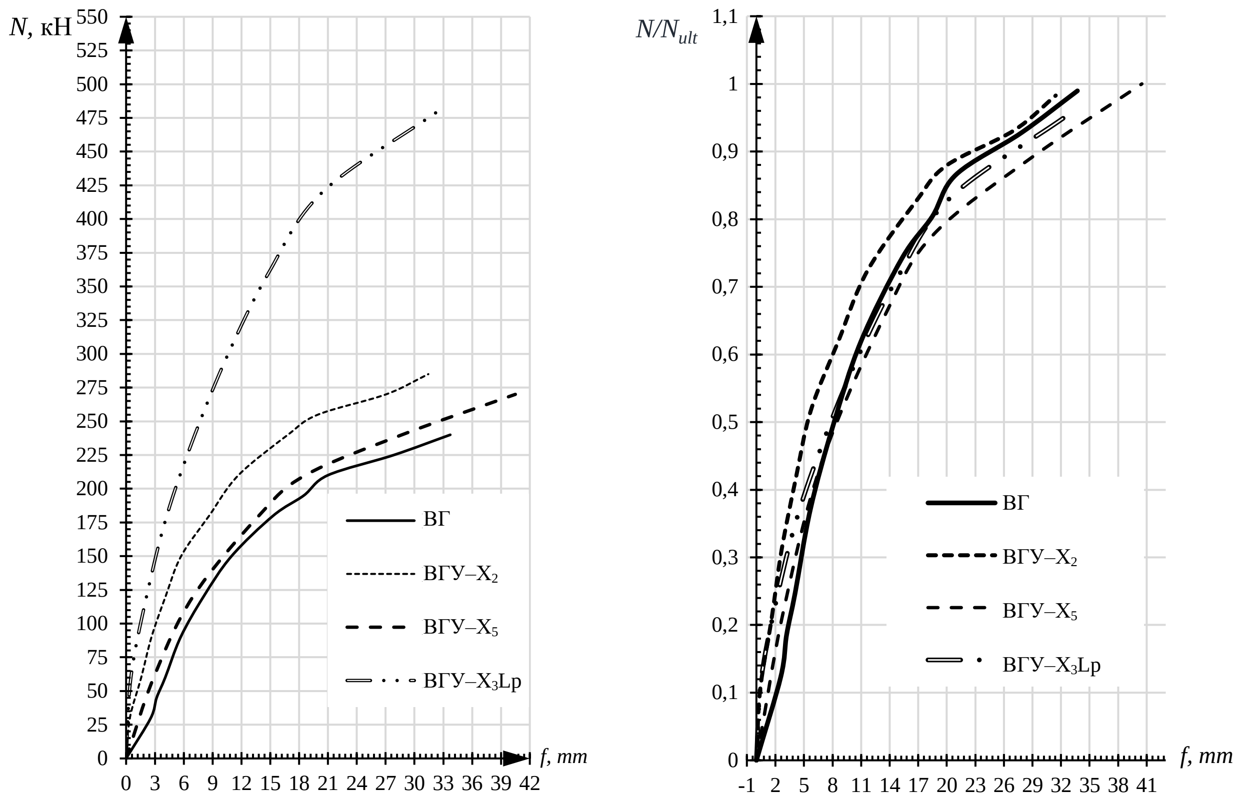


Рис. 2. Графики изменения прогибов опытных образцов при изменении уровня нагрузки (слева) и относительном уровне нагрузки N/N_{ult} (справа)

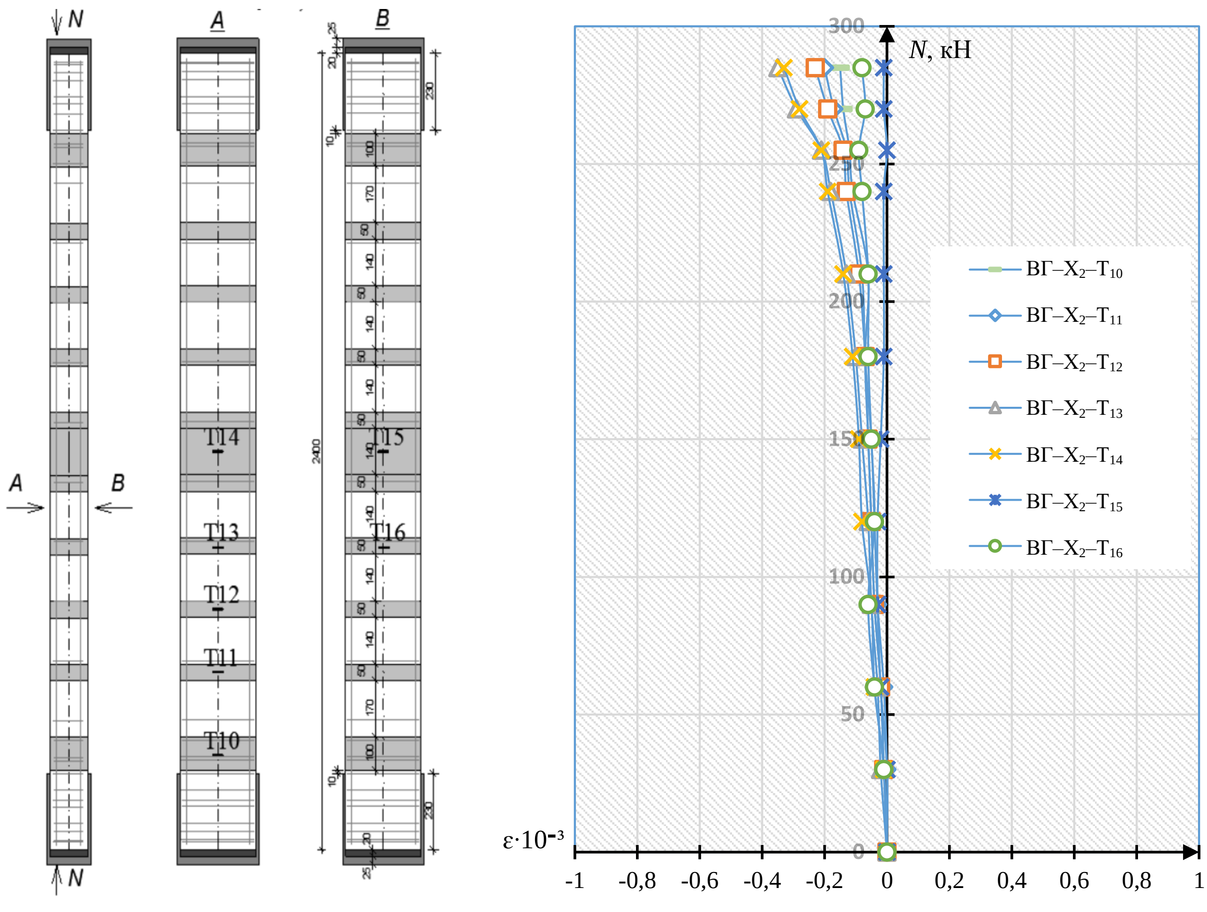


Рис. 3. Определение относительных деформаций в композитных материалах стойки шифра ВГУ-Х3

Для каждого образца представлено описание результатов изменения относительных деформаций в композитных материалах и поведение стойки в целом.

ВГУ–Х$_3$ — стойка, усиленная композитными материалами в поперечном направлении с расположением хомутов с шагом 190 мм, шириной 50 мм. На приопорном участке установлено два хомута шириной 100 мм. В центре хомут шириной 240 мм. Два хомута, расположенные в растянутой грани, показали относительную деформацию в пределах $0{,}08{\times}10^3$.

В сжатой зоне установленные тензодатчики показали самые большие относительные деформации в середине стойки. Значения относительных деформаций в тензодатчиках Т13 и Т14 были равны $0{,}38{\times}10^{-3}$. В остальных тензодатчиках относительные деформации уменьшались с $0{,}25{\times}10^{-3}$ до $0{,}08{\times}10^{-3}$ по мере приближения хомутов к краю конструкции.

ВГУ–Х$_3$L$_p$ — железобетонная стойка усилена поперечными композитными хомутами и полуобоймой, расположенной в центре по длине стойки. В растянутой грани установлены две ламели, при этом, поперечное усиление наклеивалось поверх ламелей.

Тензодатчики были установлены на полуобойме в растянутой и в сжатой зонах и на ламелях в нижней части колонны между хомутами. Тензодатчик Т8, расположенный в растянутой зоне поперечного усиления показал нулевые деформации, датчики на полуобойме (Т10, Т11, Т13), со стороны сжатой зоны бетона, показали относительные деформации в пределах от $0{,}6{\cdot}10^{-3}$ до $0{,}9{\cdot}10^{-3}$. Максимальные деформации на растяжение в продольно расположенных ламелях показали тензодатчики Т4 и Т5, расположенные ближе к центру конструкции. Предельные относительные деформации достигли значения $2{,}9{\cdot}10^{-3}$. По мере отдаления от центра зоны расположения тензодатчиков в ламелях относительные деформации уменьшились до $1{,}8{\cdot}10^{-3}$.

Тензодатчики под номером Т6, Т7, Т9, Т16 в процессе выполнения эксперимента перестали работать по техническим причинам.

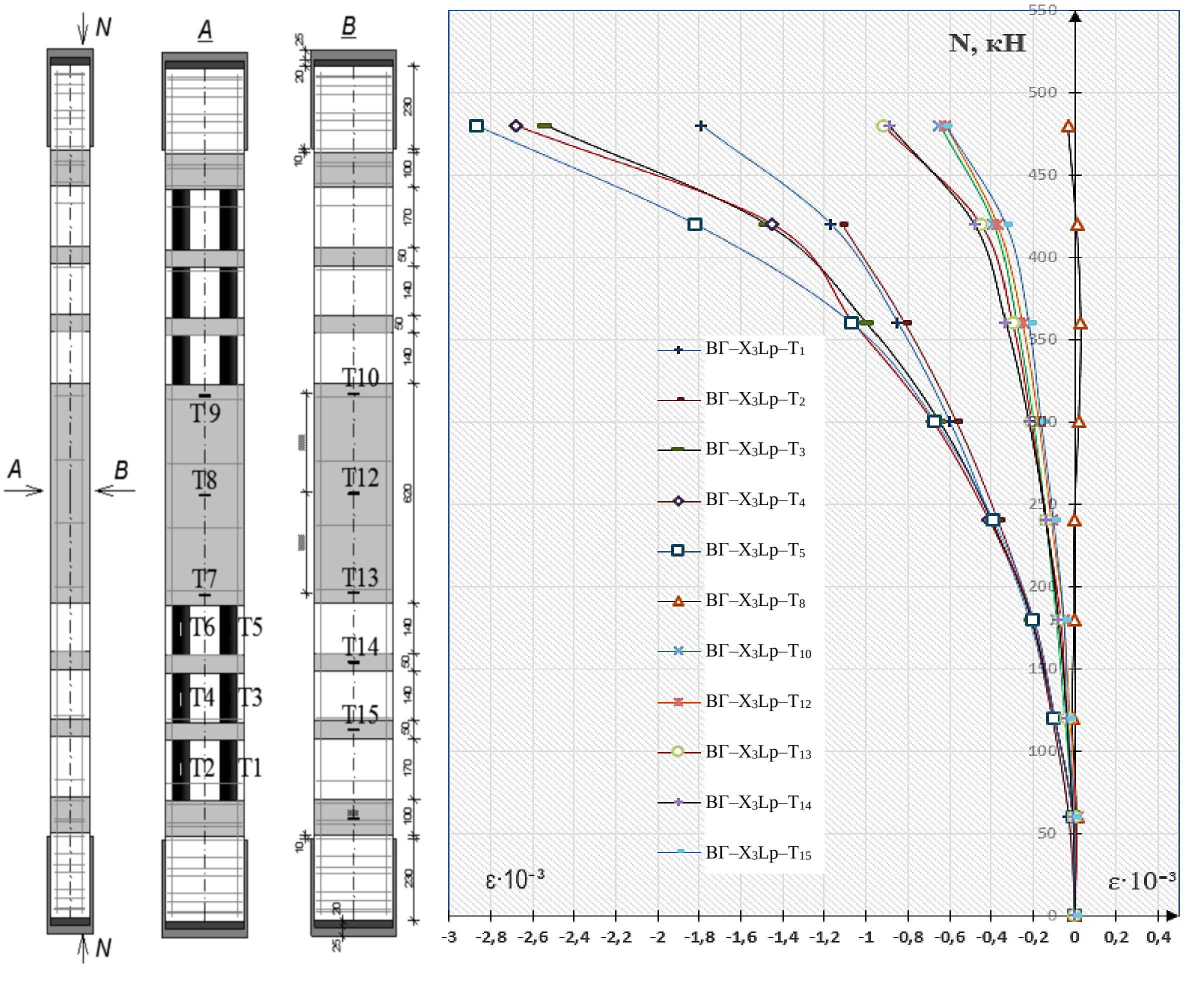


Рис. 4. Определение относительных деформаций в композитных материалах стойки шифра ВГУ–Х$_3$L$_p$

ВГУ–X$_5$ — железобетонная стойка, усиленная обоймой. Тензодатчики наклеены на растянутую и сжатую грань колонны, вдоль волокон поперечного усиления. Относительные деформации композитных материалов на растянутой грани варьировались в пределах от 0 до $0{,}2\cdot10^{-3}$, на сжатой — от $0{,}35\cdot10^{-3}$ до $1{,}0\cdot10^{-3}$. Датчики Т13 и Т14 зафиксировали предельные деформации растяжения, это объясняется тем, что они были расположены в зоне наибольшего изгиба конструкции.

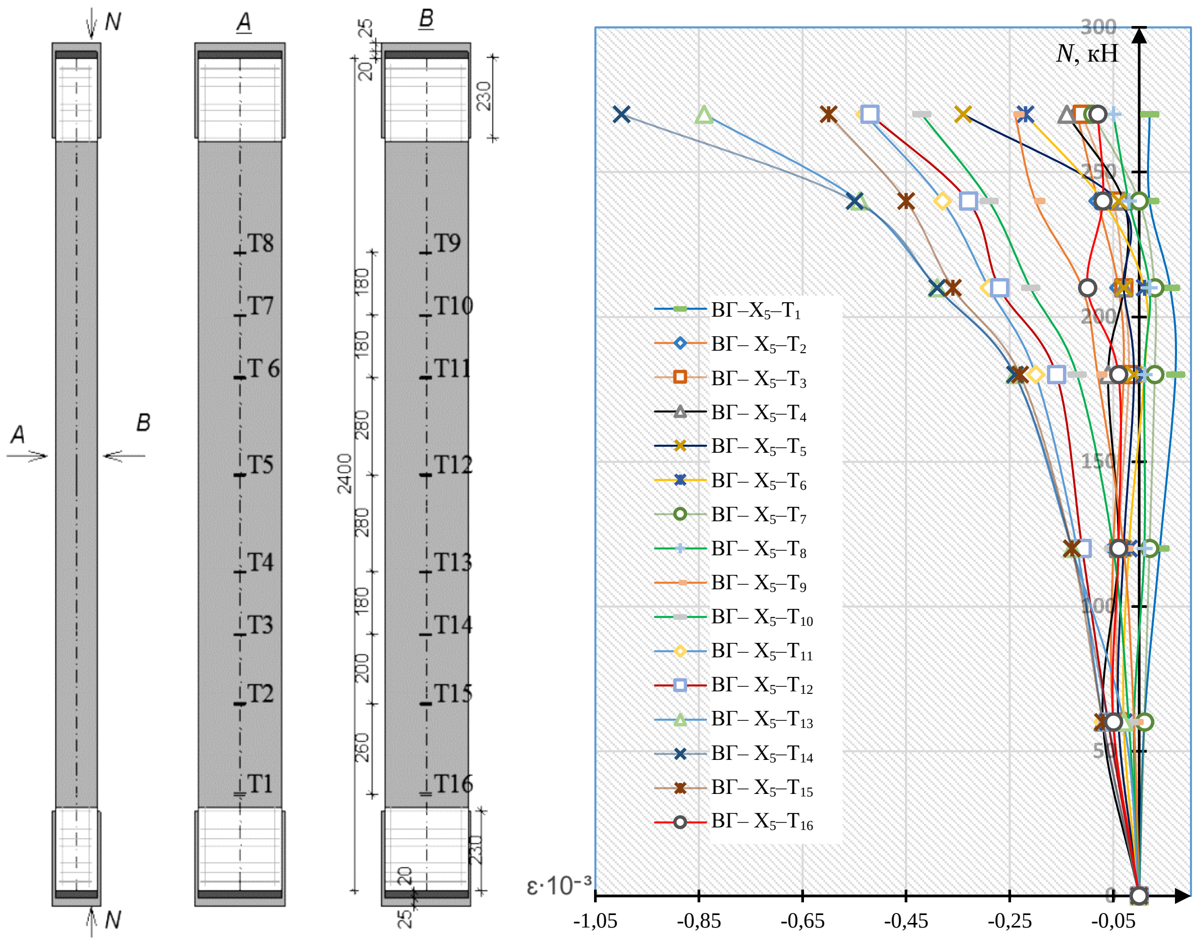


Рис. 5. Определение относительных деформаций в композитных материалах стойки шифра ВГУ–X$_5$

Обсуждение и заключение. Анализ результатов экспериментов и определение наиболее эффективных вариантов усиления выполнялось на основе трех характеристик, а именно:

– коэффициента усиления по предельной прочности, при прямом сопоставлении результатов и при приведенной прочности бетона;

– уровня нагрузки при предельном прогибе для промышленных зданий ($e_0 = 6$ мм);

– напряжениям в композитном поперечном и продольном усилении, полученным по результатам показаний тензодатчиков.

Анализ и обработка результатов эксперимента позволили заключить следующее: при прямом сопоставлении прочности усиленных образцов по сравнению с прочностью эталонного, получили для поперечного усиления прирост прочности, не превышающей 20 %, при этом композитная обойма показала меньшую эффективность, чем прерывистое поперечное усиление. При приведенной прочности бетона усиленных образцов к эталонному эффективность усиления повысилась до 20–30 %. Однако несмотря на увеличение прочности усиленных образцов, повышение жесткости было незначительным, о чем говорят кривые на графиках прогибов (рис. 2).

Для образца, усиленного полуобоймой и продольно расположенными ламинатами, наблюдается существенный прирост прочности и жесткости. Коэффициенты усиления при прямом сопоставлении и приведенной прочности бетона показали значения $2{,}08\cdot10^{-3}$ и $1{,}84\cdot10^{-3}$ соответственно.

Эффективность усиления при предельно допустимом прогибе, равном 6 мм, для железобетонных колонн одноэтажных промышленных зданий с мостовыми кранами для образцов, усиленных поперечным армированием, коэффициенты усиления увеличились до значений $1{,}58\cdot10^{-3}$ и $1{,}35\cdot10^{-3}$. Для стойки, усиленной в продольном направлении, эффективность усиления осталась прежней.

Из приведенных выше данных следует, что композитное усиление, которое в соответствии с СП с параметрами как у опытных образцов, на самом деле считается неэффективным для увеличения прочности, существенно увеличивает несущую способность внецентренно-сжатых гибких конструкций. Наибольшую эффективность для данных характеристик опытных образцов показывает совместная работа продольного и поперечного композитного усиления. В этом случае увеличение прочности в среднем составляет в два раза.

Анализ графиков изменения относительных деформаций позволил заключить следующее:

– тензодатчики, расположенные на гранях конструкции стойки ВГУ–X_2, показали очень маленькие деформации, что говорит либо о переармировании внешними композитными материалами опытного образца, либо о разрушении стойки в местах усиления. В любом случае, сделать однозначный вывод не представляется возможным, следовательно, требуется произвести дополнительные исследования для определения причины столь малого включения в работу внешнего композитного усиления. В основу данных исследований следует включить разное количество слоев композитного усиления и варьирование шага композитных хомутов;

– хомут, расположенный в середине стойки, по своей деформативности не отличается от рядом расположенных хомутов. Железобетонная стойка разрушается вне зоны расположения хомута, следовательно, можно сделать вывод, что устройство центрального хомута является неэффективным.

– тензодатчики, расположенные в композитной обойме стойки ВГУ–X_5, показали деформации существенно больше, чем в предыдущем образце. При этом на начальных уровнях нагрузки разница деформаций композитных материалов растянутой и сжатой граней была несущественна. Перекос в деформациях произошел на уровнях нагрузки, превышающих 70 % от разрушающей. Относительные деформации в зоне разрушения достигали значений $0{,}85 \cdot 10^{-3}$ – $1 \cdot 10^{-3}$. Из показаний тензодатчиков можно сделать вывод, что композитные материалы вступают в работу, однако, небольшие деформации показывают явное внешнее переармирование;

– в образце, усиленном в продольном и поперечном направлении композитными материалами, относительные деформации развивались так же, как и в обойме, в широком композитном хомуте. Относительные деформации не превышали значения $1 \cdot 10^{-3}$. Из этого можно сделать вывод, что композитное поперечное армирование выполнено с перерасходом материалов;

– тензодатчики, расположенные в ламелях, показали примерно одинаковые симметричные деформации в двух ламелях, при этом предельные деформации достигали значений $2{,}6 \cdot 10^{-3}$ – $2{,}9 \cdot 10^{-3}$. Максимальные значения деформаций были в зонах ламелей, расположенных ближе к центру конструкции, что говорит о неравномерном растяжении композитных ламелей по длине колонны.

Из результатов эксперимента и проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

– усиление гибких внецентренно-сжатых железобетонных образцов не рекомендуется выполнять при помощи поперечного композитного усиления, несмотря на то, что прирост прочности образцов при предельно допустимых прогибах для конструкций достигает 35–58 %. Это связано с тем, что есть более эффективные методы усиления, основанные на использовании композитных материалов, расположенных в продольном направлении;

– при использовании комбинированного метода усиления в расчетах необходимо учитывать поперечное композитное армирование, однако количество слоев тканей или общей площади композитного материала следует уменьшить;

– композитное продольное усиление дает существенный прирост прочности и жесткости образцов. Система усиления позволяет работать совместно с бетоном конструкций вплоть до разрушения опытных образцов;

– при проектировании продольного усиления наблюдается неравномерное растяжение углепластиковых ламелей по длине конструкции, из этого следует, что целесообразно использовать неравномерное по площади поперечное сечение композитного материала продольного усилия. Этого можно добиться при помощи использования вместо ламелей углеткани с разной толщиной, достигаемой за счет количества слоев.

Список литературы

1. Корсаков Н.В. *Анализ повреждений и видов усилений сжатых железобетонных конструкций*. В: Тезисы докладов конкурса научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета. Волгоград; 2021. С. 468-469.

2. Гроздов В.Т. *Усиление строительных конструкций при реставрации зданий и сооружений*. СПб; 2005. 114 с. URL: https://dwg.ru/dnl/11364 (дата обращения 16.09.2023).

3. Онуфриев Н.М. *Усиление железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений*. Москва Стройиздат; 1965. 342 с. URL: https://dwg.ru/dnl/7364 (дата обращения 12.08.2023).

4. Семенюк-Ситников В.В. *Количественная оценка влияния устройства глубокого котлована на близлежащие здания в стесненных условиях городской застройки.* Дис. канд. техн. наук. Москва, 2005. URL:

https://www.dissercat.com/content/kolichestvennaya-otsenka-vliyaniya-ustroistva-glubokogo-kotlovana-na-blizlezhashchie-zdaniya (дата обращения 12.08.2023).

5. Мареева О.В., Кловский А.В. Оценка эффективности способов усиления железобетонных колонн при реконструкции. *Природообустройство*. 2017;(2):33–41. URL: http://elib.timacad.ru/dl/full/gmgup-05-2017-02.pdf/download/gmgup-05-2017-02.pdf (дата обращения 18.08.2023).

6. Теряник В.В., Бирюков А.Ю. Результаты экспериментальных исследований прочности и деформативности сжатых усиленных элементов реконструируемых зданий. *Вестник ЮУрГУ: Строительство и архитектура.* 2009;35(168). URL: https://dspace.susu.ru/handle/0001.74/831 (дата обращения 18.09.2023).

7. Иванов Ю.В. *Реконструкция зданий и сооружений: Усиление, восстановление, ремонт*; 2012. 312 с. https://elima.ru/books/?id=928 (дата обращения 10.09.2023).

8. Залесов А.С. *Развитие методов расчета железобетонных конструкций в России.* В: Сборник научных статей к 80-летию НИИЖБ им. А.А. Гвоздева; 2007. С. 5–10.

9. Тамразян А.Г. Бетон и железобетон: проблемы и перспективы. *Промышленное и гражданское строительство*. 2014;(7):51–54.

10. Клочкова З.Ю., Суслова А.Е. Применение железобетона и его преимущества, сравнительно с другими строительными материалами. В: *Материалы всероссийской научно-технической конференции «Комплексное изучение и освоение недр Европейского Севера России»*. Ухта; 2021. С. 110–112.

11. Аль Каради Али. Основные физико-механические свойства железобетона. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова.* 2013;(5):39–42.

12. Гарибов Р.Б. *Сопротивление железобетонных несущих конструкций при агрессивных воздействиях окружающей среды.* Дис. док. техн. наук. Саратов, 2008. URL: https://www.dissercat.com/content/soprotivlenie-zhelezobetonnykh-nesushchikh-konstruktsii-pri-agressivnykh-vozdeistviyakh-okru (дата обращения 12.09.2023).

13. Доломанюк Р.Ю. Оценка состояния железобетонных конструкций для регрессивной зависимости коррозийных повреждений стальной арматуры от толщины защитного слоя бетона в условиях открытой атмосферы. В: *Сборник материалов III Национальной научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство»*; 2020. С. 524–528.

14. Курбанов З.А., Грушевский К.Е. *Усиление сборной железобетонной колоны методом железобетонной обоймы*. В: *Сборник статей Международной научно-практической конференции «Инновационное развитие: потенциал науки и современного образования»: в 3 частях*; 2018. С. 169–171.

15. Хаютин Ю.Г., Чернявский В.Л., Аксельрод Е.З. Ремонт и усиление железобетонных конструкций в зданиях из монолитного железобетона. В: *Сборник докладов «Проектирование и строительство монолитных многоэтажных жилых и общественных зданий, мостов и тоннелей»*; 2004. С. 195–199. URL: https://interaqua.biz/stati/30-remont-i-usilenie-zhelezobetonnykh-konstruktsij-v-zdaniyakh-iz-monolitnogo-zhelezobetona (дата обращения 22.08.2023).

16. Данилов С.В., Фомичева Л.М. Усиление железобетонных колонн стальными обоймами. В: *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии. материалы международной научно-технической конференции*. 2017. С. 240–241.

17. Теряник В.В. *Прочность и устойчивость внецентренно-сжатых элементов, усиленных железобетонными и металлическими обоймами*. Автореф. дис. докт. техн. наук. Челябинск; 2007. 24 с. URL: http://www.dslib.net/stroj-konstrukcii/prochnost-i-ustojchivost-vnecentrenno-szhatyh-jelementov-usilennyh-zhelezobetonnymi.html (дата обращения 22.08.2023).

18. Polskoy P., Georgiev S., Muradyan V., Shilov A. The Deformability of Short Pillars in Various Loading Options and External Composite Reinforcement. *MATEC Web of Conferences*. 2018;(196):02026. URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/201819602026

19. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. О влиянии гибкости стоек на эффективность композитного усиления. *Инженерный вестник Дона*. 2015;(4). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/o-vliyanii-gibkosti-stoek-na-effektivnost-kompozitnogo-usileniya (дата обращения 29.08.2023).

20. Польской П.П., Маилян Д.Р., Георгиев С.В. Прочность и деформативность коротких усиленных стоек при малых эксцентриситетах. *Инженерный вестник Дона*. 2014;(4). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/prochnost-i-deformativnost-korotkih-usilennyh-stoek-pri-malyh-ekstsentrisitetah (дата обращения 02.09.2023).

21. Георгиев С.В., Меретуков З.А., Соловьева А. И. Сравнение методик усиления внешним армированием композитных материалов. *Инженерный вестник Дона*. 2021;(10). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-metodik-usileniya-vneshnim-armirovaniem-kompozitnyh-materialov (дата обращения 06.09.2023).

22. Georgiev S, Mailyan D, Blyagoz A. Proposals for Determining the Relative Deformations Design Value of εb3 Concrete in Volumetric Deformation Conditions. *Materials Science Forum*. 2021;(1043):155-162. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.155

23. Mander JB, Priestly MJN, Park R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering.* 1988;114(8):1804-1826. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)

References

1. Korsakov NV. Analysis of Deformations and Types of Reinforcements in Compressed Reinforced Concrete Structures. In: *Collection of Abstracts of the Competition of Volgograd State University Students' Scientific Papers*. Volgograd; 2021. P. 468–469. (In Russ.).

2. Grozdov VT. *Strengthening the Building Structures during Restoration of Buildings and Structures*. Saint Petersburg; 2005. 114 p. URL: https://dwg.ru/dnl/11364 (accessed: 16.09.2023). (In Russ.).

3. Onufriev NM. *Strengthening Reinforced Concrete Structures of Industrial Buildings and Structures.* Moscow: Stroiizdat; 1965. 342 p. URL: https://dwg.ru/dnl/7364 (accessed: 12.08.2023). (In Russ.).

4. Semenyuk-Sitnikov VV. *Quantitative Assessment of the Impact of a Deep Pit on Nearby Buildings in Condition of Cramped Urban Construction.* Dis. Cand. (Engineering). Moscow, 2005. URL: https://www.dissercat.com/content/kolichestvennaya-otsenka-vliyaniya-ustroistva-glubokogo-kotlovana-na-blizlezhashchie-zdaniya (accessed: 12.08.2023). (In Russ.).

5. Mareeva OV, Klovskii AV. Assessment of the Efficiency of Strengthening of Reinforced Concrete Columns during Reconstruction. *Prirodoobustrojstvo*. 2017;(2):33–41. URL: http://elib.timacad.ru/dl/full/gmgup-05-2017-02.pdf/download/gmgup-05-2017-02.pdf (accessed: 18.08.2023). (In Russ.).

6. Teryanik VV, Biryukov AYu. Results of Experimental Investigations of the Strength and Deformability of Reinforced Compression Elements of Reconstructed Buildings. *Bulletin of the South Ural state University: Series "Construction Engineering and Architecture"*. 2009;35(168). URL: https://dspace.susu.ru/handle/0001.74/831 (accessed: 18.09.2023). (In Russ.).

7. Ivanov YuV. *Reconstruction of Buildings and Structures: Strengthening, Restoration, Repair*; 2012. 312 p. https://elima.ru/books/?id=928 (accessed: 10.09.2023). (In Russ.).

8. Zalesov AS. Development of Methods for Calculating Reinforced Concrete Structures in Russia. In*: Collection of Scientific Articles in Honour of 80th Anniversary of the Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named A.A. Gvozdev*; 2007. P. 5–10. (In Russ.).

9. Tamrazyan AG. Concrete and Reinforced Concrete: Problems and Prospects. *Civil Engineering*. 2014;(7):51–54. (In Russ.).

10. Klochkova ZYu, Suslova AE. Application of Reinforced Concrete and Its Advantages Compared to Other Building Materials. In: *Proceedings of the All-Russian Science and Engineering Conference "Comprehensive Study and Development of the Subsoil of the European North of Russia*. Ukhta; 2021. P. 110–112. (In Russ.).

11. Al' Karadi A. Basic Physical and Mechanical Properties of Reinforced Concrete. Bulletin of Belgorod State Technological University named after V G Shukhov. 2013;(5):39–42. (In Russ.).

12. Garibov RB. *Resistance of Reinforced Concrete Load-Bearing Structures under Aggressive Environmental Influences*. Dis. Dr.Sci.(Engineering). Saratov, 2008. URL: https://www.dissercat.com/content/soprotivlenie-zhelezobetonnykh-nesushchikh-konstruktsii-pri-agressivnykh-vozdeistviyakh-okru (accessed: 12.09.2023). (In Russ.).

13. Dolomanyuk RYu. Condition Assessment of Reinforced Concrete Structures for a Regression Based on the Corrosive Damage of Steel Reinforcement from the Thickness of the Protective Concrete Layer in the Open Atmosphere. In: *Proceedings of the III National Science and practical Conference "Education, Transport, Innovations. Construction"*; 2020. P. 524–528. (In Russ.).

14. Kurbanov ZA, Grushevskii KE. Strengthening of Precast Reinforced Concrete Columns by the Method of Concrete Collars. In: *Proceedings of the International Science and Practical Conference "Innovative Development: the Potential of Science and Modern Education": in 3 parts*; 2018. P. 169–171. (In Russ.).

15. Khayutin YuG, Chernyavskii VL, Aksel'rod EZ. Repair and Strengthening of Reinforced Concrete Structures in Buildings Made of Monolithic Reinforced Concrete. In: *Collection of Papers "Design and Construction of Monolithic Multi-Storey Residential and Public Buildings, Bridges and Tunnels"*; 2004. P. 195–199. URL: https://in-teraqua.biz/stati/30-remont-i-usilenie-zhelezobetonnykh-konstruktsij-v-zdaniyakh-iz-monolitnogo-zhelezobetona (accessed: 22.08.2023). (In Russ.).

16. Danilov SV, Fomicheva LM. Strengthening the Reinforced Concrete Columns with Steel Cages. In: *Proceedings of the International Science and Engineering Conference "Materials, Equipment and Resource Saving Technologies"*. 2017. P. 240–241. (In Russ.).

17. Teryanik VV. *Strength and Stability of Eccentrically Compressed Elements Reinforced With Reinforced Concrete and Metal Cages.* Extended Abstract of Cand.Sci.(Engineering) Dissertation. Chelyabinsk; 2007. 24 p. URL: http://www.dslib.net/stroj-konstrukcii/prochnost-i-ustojchivost-vnecentrenno-szhatyh-jelementov-usilennyh-zhelezobet-onnymi.html (accessed 22.08.2023). (In Russ.).

18. Polskoy P, Georgiev S, Muradyan V, Shilov A. The Deformability of Short Pillars in Various Loading Options and External Composite Reinforcement. *MATEC Web of Conferences*. 2018;(196):02026. URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/201819602026

19. Polskoy PP, Mailyan DR, Georgiev SV. About the Effect of Poles' Flexibility on the Efficiency of Composite Reinforcement. *Engineering Journal of Don*. 2015;(4). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/o-vliyanii-gibkosti-stoek-na-effektivnost-kompozitnogo-usileniya (accessed: 29.08.2023). (In Russ.).

20. Polskoy PP, Mailyan DR, Georgiev SV. Strength and Deformability of Short Reinforced Poles at Small Eccentricities. *Engineering Journal of Don*. 2014;(4). URL: https://cyberleninka.ru/arti-cle/n/prochnost-i-deformativnost-korotkih-usilennyh-stoek-pri-malyh-ekstsentrisitetah (accessed: 02.09.2023). (In Russ.).

21. Georgiev SV, Meretukov ZA, Solov'eva AI. Comparison of Methods for Strengthening with External Reinforcement of Composite Materials. *Engineering Journal of Don*. 2021;(10). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-metodik-usileniya-vneshnim-armirovaniem-kompozitnyh-materialov (accessed: 06.09.2023). (In Russ.).

22. Georgiev S, Mailyan D, Blyagoz A. Proposals for Determining the Relative Deformations Design Value of $\varepsilon b3$ Concrete in Volumetric Deformation Conditions. *Materials Science Forum*. 2021;(1043):155-162. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1043.155

23. Mander JB, Priestly MJN, Park R. Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering.* 1988;114(8):1804-1826. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804)

Поступила в редакцию 22.09.2023
Поступила после рецензирования 03.10.2023
Принята к публикации 16.10.2023

Об авторах:

Георгиев Сергей Валерьевич, доцент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, sergey.georgiev@bk.ru

Маилян Дмитрий Рафаэлович, профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID, dmailyan868@mail.ru

Соловьева Анастасия Ивановна, инженер и ассистент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ассистент, ORCID, 98rosignol@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Георгиев С.В. — анализ результатов исследований, проведение расчетов, формирование выводов.

Маилян Д.Р. — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство, корректировка выводов.

Соловьева А.И. — выполнение расчетов, подготовка текста.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 22.09.2023
Revised 03.10.2023
Accepted 16.10.2023

About the Authors:

Sergey V. Georgiev, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, sergey.georgiev@bk.ru

Dmitry R. Mailyan, Dr.Sci. (Engineering), Professor of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Professor, ORCID, dmailyan868@mail.ru

Anastasia I. Solovyova, Engineer and Assistant at the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), ORCID, 98rosignol@mail.ru

Claimed contributorship:

Georgiev SV — analysis of the research results, calculations, formulating the conclusions.

Mailyan DR — formulating the main concept, aim and objectives of the research, scientific supervision, correcting the conclusions.

Solovyova AI — calculations, text preparation.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.